Pêches et Océans Canada | Fisheries and Oceans Canada
Sciences | Science
Secrétariat canadien de consultation scientifique
Région de la capitale nationale | Avis scientifique 2010/012

FERTILISATION DES OCÉANS : ATTÉNUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Figure 1 : Les six régions administratives du ministère des Pêches et des Océans (MPO).

Contexte :

Des options de géo-ingénierie sont proposées pour réduire le taux de réchauffement de la planète associé à l'accumulation de gaz à effet de serre dus aux activités humaines. La fertilisation des océans tente de stocker dans l'océan le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère par l'ajout d'un nutriment limitatif dans une région sélectionnée de l'océan. L'élément nutritif stimule la croissance de phytoplancton, lequel transforme le dioxyde de carbone en matière organique par photosynthèse, et ensuite la matière organique nouvellement formée est stockée à la subsurface de l'océan, principalement sous forme de particules organiques qui s'enfoncent.

À l'échelle internationale, la Convention de Londres et le Protocole de Londres (CL/PL) sont considérés comme les instruments mondiaux avec l'autorité appropriée en vue de gérer la fertilisation des océans. La Convention de Londres/le Protocole de Londres sont des traités internationaux conçus en vue de régir la pollution marine et de réglementer le déversement de déchets en mer. Environnement Canada est la principale autorité compétente fédérale pour les deux traités et a l'appui des ministères des Pêches et des Océans, des Affaires étrangères et du commerce international, ainsi que de la Justice. En mai 2008, on a confié aux groupes de travail scientifique et juridique de la CL/PL la tâche d'évaluer la question de la fertilisation des océans. Par la suite, les organismes de réglementation ont recommandé de poursuivre avec l'examen des options pour la réglementation de l'activité. Le groupe de travail juridique a proposé que les Parties « reconnaissent le concept de la réglementation afin que les activités de nature commerciales soient interdites ». Ce concept n'a été inclus dans aucun texte de la résolution, mais les réunions des parties ont plutôt convenu que les activités de fertilisation des océans soient

interdites pour l'instant, sauf pour les travaux de recherche scientifique justifiés. Toutefois, on n'a pas encore défini ce que sont des travaux de recherche scientifique justifiés.

En février 2009, le Groupe de travail technique intersessions sur la fertilisation des océans de la Convention de Londres/du Protocole de Londres a entrepris l'élaboration d'un « cadre d'évaluation provisoire pour la recherche scientifique sur la fertilisation des océans ». Le cadre constitue un outil pour évaluer au cas par cas les propositions de recherche scientifique afin de déterminer, entre autres, si une activité proposée est conforme aux buts et aux objectifs de la Convention de Londres/du Protocole de Londres et satisfait aux exigences, le cas échéant.

Ce document traite des connaissances scientifiques et de la compréhension actuelles de la fertilisation des océans, des incertitudes, ainsi que des questions fondamentales nécessaires pour une prise de décisions éclairée. Dans le cadre de cette évaluation, on analyse dans ce document le cadre d'évaluation provisoire créé par le groupe de travail sur la fertilisation des océans de la Convention de Londres/du Protocole de Londres.

SOMMAIRE

- La fertilisation des océans a été proposée comme méthode de géo-ingénierie qui permettrait d'augmenter, dans certaines régions de l'océan mondial, l'absorption par les océans du dioxyde de carbone de l'atmosphère. La National Academy of Sciences des É.-U. définit la géo-ingénierie comme des « options qui signifieraient une ingénierie à grande échelle de notre environnement afin de lutter contre les effets des changements dans la chimie atmosphérique ou de les contrecarrer ».

- La fertilisation des océans représente une approche de géo-ingénierie mise de l'avant par l'homme dans le but principal de stimuler la production primaire dans les océans. Les propositions de fertilisation se divisent grossièrement entre les ajouts de « micronutriments » et les ajouts de « macronutriments ».

- L'ajout de fer comme micronutriment est de loin la technique de fertilisation artificielle des océans la plus étudiée; l'azote est l'option la plus probable pour la fertilisation en macronutriments.

- Les conséquences prévues de la fertilisation à grande échelle comprennent les changements de composition de la communauté phytoplanctonique et de structure du réseau trophique, l'exportation verticale des matériaux d'origine biologique, la réduction de l'oxygène de subsurface et la production de gaz ayant des effets sur le climat, comme l'oxyde nitreux.

- Les résultats des expériences de fertilisation en fer des océans qui ont été effectuées jusqu'à maintenant n'ont pas permis de déterminer l'échelle à laquelle la fertilisation entraînera des modifications importantes de l'écosystème. Il y a toutefois une certaine confiance scientifique que nous puissions déterminer une « échelle seuil », de sorte que la fertilisation jusqu'à cette échelle ne provoquerait probablement pas de changements persistants pour un écosystème.

- La fertilisation à l'azote à grande échelle des eaux côtières comporte des risques écologiques élevés et des perturbations de l'écosystème possiblement irréversibles.

- Le cadre d'évaluation provisoire de la Convention de Londres/du Protocole de Londres fournit un mécanisme d'évaluation, cas par cas, des propositions de fertilisation des océans afin de déterminer si celles-ci représentent des recherches scientifiques justifiées.

- Il est recommandé de faire un examen de la base de connaissances en vue de l'élaboration et de la mise en application de critères pour effectuer l'évaluation environnementale des expériences de fertilisation, ainsi que pour établir une « échelle seuil » en deçà de laquelle les propositions pourraient être exemptées d'une évaluation complète.

- Une préoccupation relativement à la capacité d'un seul pays à mettre en œuvre le cadre d'évaluation donne à penser que, si possible, il devrait y avoir un organisme international disponible pour aider à faire les évaluations.

- Les expériences de fertilisation ont été très précieuses pour l'étude de la dynamique et du fonctionnement des écosystèmes océaniques et des cycles biogéochimiques, mais il est peu probable que des expériences isolées puissent permettre de résoudre les questions critiques entourant les conséquences à long terme de la fertilisation des océans comme mesure d'atténuation contre les changements climatiques.

- Il faudrait favoriser la recherche scientifique future sur la fertilisation des océans afin d'améliorer notre compréhension de la réponse des océans à l'ajout d'éléments nutritifs.

INTRODUCTION

Avec l'émission annuelle de plus de huit milliards de tonnes métriques de carbone provenant des combustibles fossiles, réduire le taux d'augmentation du dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère et le réchauffement planétaire associé à l'augmentation de l'effet de serre du CO_2 continue d'être un défi mondial.

Les crédits d'émission de carbone constituent un instrument financier représentant la réduction nette des concentrations de gaz à effet de serre. Grâce à ce type d'instruments, des sociétés ou des pays incapables de respecter les limites d'émissions peuvent acheter des crédits d'émission de carbone qui correspondent à une partie de leurs émissions. À la faveur de ces programmes de crédits d'émission de carbone, la fertilisation des océans a été proposée comme méthode de géo-ingénierie qui permettrait d'augmenter, dans certaines régions, l'absorption par les océans du dioxyde de carbone dans l'atmosphère. La National Academy of Sciences des É.-U. définit la géo-ingénierie comme des « options qui signifieraient une ingénierie à grande échelle de notre environnement afin de lutter contre les effets des changements dans la chimie atmosphérique ou de les contrecarrer ». La fertilisation des océans représente une approche de géo-ingénierie mise de l'avant par l'homme dans le but principal de stimuler la production primaire dans les océans. Les propositions de fertilisation se divisent grossièrement entre les ajouts de « micronutriments » et les ajouts de « macronutriments ».

Il est nécessaire d'avoir la possibilité de prévoir et de détecter les effets secondaires en aval de la fertilisation en fer des océans avant de la considérer comme une technologie viable d'atténuation des changements climatiques. L'évaluation de ces impacts est difficile à faire et il est peu probable de pouvoir prévoir avec certitude les effets secondaires.

La préoccupation mondiale selon laquelle la fertilisation à grande échelle des océans pourrait avoir des répercussions néfastes sur l'environnement marin est démontrée par les déclarations, les accords et les recommandations faits par divers organismes internationaux, comme ceux-ci :

Comité scientifique sur la recherche océanique;

Groupe mixte d'experts chargé d'étudier les aspects scientifiques de la protection de l'environnement marin;

Écologie et océanographie mondiale des floraisons d'algues nuisibles; et

Convention sur la diversité biologique.

En particulier, en 2008, la Conférence des parties des Nations Unies sur la Convention sur la diversité biologique a limité la fertilisation des océans aux études de recherche scientifique à petite échelle dans les eaux côtières « jusqu'à ce qu'il y ait une base scientifique adéquate permettant de justifier ces activités, y compris l'évaluation des risques associés, et jusqu'à ce qu'un mécanisme de contrôle et de réglementation mondial, transparent et efficace soit en place relativement à ces activités ».

Pour plusieurs pays, le Protocole de 1972 et de 1996 de la *Convention de Londres sur la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion de déchets et autres matières* (ci-après appelée la Convention de Londres) est considéré comme l'organisme international de réglementation approprié pour cette question. En 2008, les organismes dirigeants de la Convention de Londres ont déclaré : « étant donné l'état actuel des connaissances, les activités de fertilisation des océans autres que les recherches scientifiques justifiées devraient être interdites ». En outre, la réunion des parties contractantes a convenu de se pencher encore plus sur une résolution juridiquement contraignante ou sur une modification au Protocole de Londres lors de sa réunion d'octobre 2009. Le Canada appuie la position de la Convention sur la fertilisation des océans, laquelle recommande d'envisager la réglementation de cette pratique. En octobre 2009, les parties contractantes ont été incapables d'en arriver à un consensus quant aux meilleures pratiques de contrôle de la fertilisation des océans pour le moment. La fertilisation des océans et son éventuelle réglementation continueront de faire l'objet de discussions à la Convention de Londres et au sein d'autres organisations internationales.

Le présent examen par des pairs a été demandé afin d'étudier l'état actuel des connaissances scientifiques et la compréhension de la fertilisation des océans et des incertitudes connexes. Dans le cadre de ce processus, on étudie le sujet dans le contexte de la mise en place de certaines lignes directrices en vue d'expérimentations futures qui pourraient réduire certaines des incertitudes entourant cette question. Les produits de l'examen des pairs contribueront à élaborer une position canadienne relativement à un cadre réglementaire permettant la poursuite de la recherche scientifique sur la fertilisation des océans dans les eaux internationales. Dans le cadre de cette évaluation, ce document prend en compte le cadre d'évaluation provisoire pour la recherche scientifique sur la fertilisation des océans qui est en cours d'élaboration par le Groupe de travail technique sur la fertilisation des océans de la Convention de Londres.

Au cours d'un processus national d'examen par des pairs qui s'est tenu à Ottawa (29 et 30 septembre 2009), des chercheurs du gouvernement et des universités se sont penchés sur les questions suivantes :

1. Quelles sont les conséquences négatives les plus importantes, prévues et imprévues, de la fertilisation des océans, et quel est le degré de certitude scientifique vis-à-vis des impacts d'une telle pratique?

2. Dispose-t-on de suffisamment de connaissances pour déterminer l'échelle à laquelle un projet ne sera pas susceptible de causer des dommages irréversibles et inacceptables à l'écosystème? Le cas échéant, quels sont les critères qui pourraient nous permettre de définir les limites supérieures associées à un tel projet?

3. Est-ce que le cadre d'évaluation provisoire de la CL/PL convient pour évaluer les propositions de recherche scientifique sur la fertilisation des océans?

4. Quels domaines de la recherche sur la fertilisation des océans affichent le caractère le plus urgent ou important?

ÉVALUATION

Les océans sont de loin les plus gros réservoirs « d'échange » de carbone sur la Terre, c.-à-d., d'échange avec l'atmosphère sur des échelles de temps de milliers d'années ou moins. Les océans ont absorbé environ la moitié des émissions anthropiques cumulatives de dioxyde de carbone jusqu'à maintenant; ces émissions proviennent de la combustion des combustibles fossiles et de la production de béton (absorption totale ~118 Gt de C jusqu'en 1995).

Le dioxyde de carbone atmosphérique est contrôlé en grande partie par deux ensembles de processus océaniques qu'on appelle la « pompe de solubilité » et la « pompe biologique ». Ensemble, ces deux processus font en sorte qu'il y a un fort gradient de carbone inorganique dissous[1] entre la surface de l'océan et l'océan profond. La pompe de solubilité est due à la plus grande solubilité du dioxyde de carbone gazeux dans l'eau froide et au fait que le fond de l'océan est surtout ventilé aux hautes latitudes (les eaux de surface s'enfoncent profondément aux hautes latitudes, puis circulent horizontalement en profondeur vers les régions tropicales et subtropicales, où il y a très peu d'échange entre les eaux de surface et les eaux profondes). La pompe biologique comprend la sédimentation à la fois des particules de carbone organique et inorganique, ainsi que le mélange vers le bas et l'advection du carbone organique dissous et la reminéralisation et la dissolution, cette dernière se produisant dans l'océan intermédiaire et en profondeur. La pompe biologique stocke le carbone dans l'océan profond, sans qu'il y ait de contact avec l'atmosphère pendant des décennies ou même des siècles; par la fertilisation des océans, on tente d'accroître artificiellement l'ampleur de la pompe biologique.

La reminéralisation du carbone organique diminue avec l'augmentation de la profondeur et se produit principalement dans les couches moins profondes. Comme les eaux moins profondes viennent habituellement en contact avec l'atmosphère après une période de temps plus courte que pour les eaux profondes, l'échelle de temps de la séquestration est probablement plutôt courte en moyenne (quelques décennies, au plus). Comme le taux de reminéralisation et la circulation des couches de subsurface où la reminéralisation se produit sont variables et mal connus, il y a une grande incertitude relativement à l'estimation de l'échelle de temps de la séquestration.

Pour que la fertilisation des océans soit une réussite en vue de la séquestration du carbone atmosphérique, le carbone doit rester en profondeur pendant une période importante. Le temps de renouvellement de l'océan profond est d'environ 500 ans en moyenne, mais certaines eaux de subsurface sont beaucoup plus âgées. Dans l'océan Pacifique Nord, par exemple, l'échange avec l'atmosphère se fait selon des échelles de temps de quelques décennies à des profondeurs d'environ 500 m et des densités de 1 026,8 kg m^{-3}. Il s'agit de la limite supérieure pour la densité de surface dans le Pacifique Nord; on suppose donc qu'à des profondeurs plus

[1] Le carbone inorganique dissous représente le total des trois espèces chimiques que le dioxyde de carbone forme une fois qu'il pénètre dans l'océan depuis l'atmosphère.

grandes, l'échelle de temps pour l'échange atmosphérique est plus longue et que ces couches plus profondes séquestreraient donc le carbone plus longtemps.

Dans cette évaluation, on examine la séquestration par la fertilisation en micronutriments et en macronutriments. L'ajout de fer comme micronutriment est de loin la technique de fertilisation artificielle des océans la plus étudiée; l'azote est l'option la plus probable pour la fertilisation en macronutriments.

Fertilisation en micronutriments

La fertilisation par le fer comme moyen de géo-ingénierie a commencé en grande partie suite aux travaux de John Martin (1935-1993) et de ses collaborateurs, dans les années 1980. M. Martin est grandement connu comme étant le père de l'« hypothèse du fer », relativement à la formation de conditions riches en éléments nutritifs et pauvres en chlorophylle. M. Martin a constaté qu'il y a très peu de fer dans le phytoplancton océanique (entre 10^{-4} et 10^{-5} moles de Fe/mole C), ce qui a fait germer l'idée qu'il serait possible de catalyser une absorption importante de dioxyde de carbone par l'océan en ajoutant des quantités relativement faibles de fer dans des régions riches en éléments nutritifs et pauvres en chlorophylle.

La première expérience de fertilisation in situ dans le Pacifique équatorial a été considérée comme une réussite, car elle a démontré sans aucune équivoque que le fer ralentissait la croissance du phytoplancton dans les régions riches en éléments nutritifs et pauvres en chlorophylle (Martin et coll., 1994). Mais ce ne fut pas une réussite du point de vue de la géo-ingénierie, car cela n'a pas démontré une exportation nette accrue du carbone de la surface de l'océan ou une absorption accrue du dioxyde de carbone atmosphérique par l'océan. Par la suite, il y a eu environ une douzaine d'expériences supplémentaires; d'autres expériences ont aussi été réalisées par des organisations commerciales, mais ces dernières n'ont pas publié leurs résultats dans la littérature scientifique. Pour la plupart de ces expériences, il y avait une certaine forme d'exportation accrue de carbone, toutefois, en tant que prototype de démonstration de géo-ingénierie, les résultats n'ont pas été particulièrement encourageants, car la séquestration de carbone par unité de fer ajoutée est plutôt faible (de Baar et coll., 2005, 2008). Lorsqu'on a mesuré l'absorption nette de dioxyde de carbone de l'atmosphère, les valeurs se sont révélées considérablement plus faibles (de Baar et coll., 2008).

La chimie aqueuse du fer est très complexe. Les formes thermodynamiquement privilégiées dans les conditions de surface océanique sont grandement réactives aux particules, c'est-à-dire qu'elles se lieront à presque n'importe quelle surface avec laquelle elles viennent en contact, de sorte que le fer est constamment enlevé de la solution et transporté vers le bas par les particules qui s'enfoncent (entraînement). Ainsi, le temps de séjour du fer dans tout l'océan est estimé à seulement une centaine d'années, comparativement à 3 000 ans pour l'azote et 30 000 ans pour le phosphore. Le temps de séjour du fer ajouté à la surface de l'océan (où les concentrations en oxygène et en matières particulaires sont toutes deux élevées) est beaucoup plus court et, dans les expériences intentionnelles de fertilisation, une grande proportion du fer ajouté précipite de la solution selon une échelle de temps variant entre quelques heures et quelques jours.

Fertilisation en macronutriments

Contrairement aux centaines de documents scientifiques publiés pour le fer, il y en a eu très peu qui ont été écrits sur la fertilisation en macronutriments. En fait, une étude pionnière du potentiel mondial de la fertilisation en macronutriments utilisant un modèle océanique (Matear

et Elliott, 2004) n'a été citée que quatre fois (ISI Web of Science, 2009/08/07) et aucun de ces articles ne traite directement d'une évaluation plus poussée de cette stratégie. On peut raisonnablement affirmer que la vérification expérimentale de la viabilité de la fertilisation en macronutriments en est à ses premiers balbutiements.

Comme on pense que presque partout en pleine mer le « nutriment limitatif » est l'azote, il a été suggéré de fertiliser les océans avec de l'azote afin de stimuler la croissance d'algues et la séquestration de carbone. Toutefois, la fertilisation à l'azote implique une masse de fertilisant beaucoup plus importante que pour le fer, et il est donc fort probable que cela se ferait dans les eaux situées plus près des côtes. La proposition de fertiliser à l'azote la mer de Sulu, dans les Philippines, a donné lieu à la publication d'un article scientifique rédigé par plusieurs spécialistes du domaine qui se sont questionnés sur les risques possibles de la fertilisation à l'azote (Glibert et coll., 2008). Les auteurs ont conclu que les coûts environnementaux et économiques de la fertilisation à l'azote sont possiblement considérables et qu'ils doivent faire l'objet d'une évaluation rigoureuse. La viabilité de la fertilisation en macronutriments comme stratégie de géo-ingénierie et la supposition qu'elle n'aura pas des conséquences écologiques néfastes extrêmes sont toutes deux fondées sur des hypothèses très ténues sur l'évolution de la structure de la communauté en réponse à la fertilisation (Glibert et coll., 2008). La fertilisation à l'azote à grande échelle des eaux côtières comporte des risques écologiques élevés et des risques de perturbations de l'écosystème possiblement irréversibles.

Une différence importante entre la fertilisation en micronutriments et la fertilisation en macronutriments est que la première tente de réduire le dioxyde de carbone atmosphérique en redistribuant les macronutriments vers le fond océanique, tandis que la deuxième tente d'accroître la quantité totale d'éléments nutritifs des océans. La répartition du carbone entre l'océan et l'atmosphère est, au moins à l'état d'équilibre, étroitement liée aux stocks d'azote et de phosphore de l'océan complet; la pompe biologique fait pencher cette répartition davantage vers l'océan en appauvrissant les réserves variables d'éléments nutritifs inutilisés à la surface de l'océan.

Les effets écologiques « en aval » de la fertilisation en micronutriments et en macronutriments seront probablement passablement différents, bien qu'ils soient grandement incertains dans chaque cas. La fertilisation en macronutriments augmentera en principe les concentrations de macronutriments présents dans l'eau de la thermocline nouvellement remontée au cours des décennies suivant la fertilisation, tandis que la fertilisation en fer aura tendance à les diminuer. Toutefois, la fertilisation en macronutriments avec de l'azote entraînera probablement un appauvrissement pour les autres macronutriments (phosphore et silice).

Réponse à des questions précises

1. **Quelles sont les conséquences négatives les plus importantes, prévues et imprévues, de la fertilisation des océans, et quel est le degré de certitude scientifique vis-à-vis des impacts d'une telle pratique?**

Les conséquences prévues de la fertilisation à grande échelle comprennent les changements de composition de la communauté phytoplanctonique et de structure du réseau trophique, l'exportation verticale des matériaux d'origine biologique, la réduction de l'oxygène de subsurface et la production de gaz ayant des effets sur le climat, comme l'oxyde nitreux (tableau 1).

Changement dans la structure de la communauté phytoplanctonique et du réseau trophique

L'une des conséquences prévues de la fertilisation des océans est un changement fondamental de la structure de la communauté phytoplanctonique. La viabilité de la fertilisation des océans comme stratégie de géo-ingénierie et l'ampleur des conséquences écologiques reposent sur des suppositions quant à l'évolution de la structure de la communauté en réponse à la fertilisation. Ces suppositions n'ont pas été testées et se révéleront probablement inexactes dans de nombreux cas.

Exportation verticale des matériaux d'origine biologique

Les floraisons phytoplanctoniques peuvent donner lieu à des concentrations de matières organiques s'enfonçant rapidement jusqu'au fond de l'océan, avec peu de reminéralisation, et si l'on pouvait supposer sans se tromper que de telles floraisons se produiraient après la fertilisation, l'échelle de temps de la séquestration serait de quelques centaines d'années. Toutefois, lors des expériences de fertilisation en pleine mer effectuées jusqu'à maintenant, cela ne s'est pas produit; il s'est même révélé difficile de détecter une exportation accrue vers le bas dans la zone euphotique (de Baar et coll., 2005).

Appauvrissement en oxygène de subsurface

La reminéralisation des matières organiques dans des conditions oxiques consomme de l'oxygène. La diminution des concentrations d'oxygène de subsurface représente une conséquence attendue et inévitable de la fertilisation des océans, et donc une conséquence prévue. Si le carbone est séquestré, il y aura une diminution de l'oxygène et il pourrait y en avoir un appauvrissement localement. On a déjà constaté une baisse d'oxygène dans la thermocline dans certaines régions et l'oxygène sera inévitablement en baisse à l'échelle mondiale avec la hausse de la température à la surface de la mer.

Acidification des océans

Bien que des tenants et des opposants de la fertilisation aient affirmé que cela atténuera ou exacerbera l'acidification des océans, respectivement, il n'y a pas de preuves scientifiques à l'appui de ces affirmations. Il est probable que la fertilisation, si elle est un succès, accélérerait l'acidification aux profondeurs où se produit la reminéralisation et altérerait la répartition spatiale des changements de pH.

Production de gaz ayant des effets sur le climat

Oxyde nitreux : L'oxyde nitreux est un puissant gaz à effet de serre qui est produit par les bactéries lors de l'oxydation de l'ammonium en nitrate (nitrification) et de la réduction du nitrate en azote gazeux (dénitrification). La nitrification se fait de façon directement proportionnelle à la reminéralisation de l'azote organique et se produit donc généralement surtout immédiatement en deçà de la zone euphotique. Toute augmentation de la production exportée augmentera inévitablement la nitrification et la production connexe d'oxyde nitreux. Ceci se produira principalement dans des zones peu profondes qui sont ventilées selon des échelles de temps de quelques décennies, au plus, sauf si l'échelle de longueur de la reminéralisation augmente considérablement. Une augmentation de la production exportée à proximité des courants de frontière orientaux intensifiera les conditions suboxiques qu'on y retrouve généralement et augmentera la production d'oxyde nitreux par dénitrification. Il est probable qu'au moins une

partie de cet oxyde nitreux s'échappera dans l'atmosphère, mais la proportion n'est pas bien connue.

Alors que les préoccupations relatives à la production de gaz ayant des effets sur le climat se concentrent souvent sur l'éventuelle production d'oxyde nitreux, d'autres gaz potentiellement produits lors des expériences de fertilisation pourraient avoir des conséquences importantes.

- *Méthane :* Le méthane est un autre puissant gaz à effet de serre qui est produit par les bactéries dans des conditions anoxiques. En raison du potentiel d'appauvrissement en oxygène de subsurface, il y a certaines préoccupations selon lesquelles la fertilisation des océans pourrait entraîner une source océanique accrue de méthane atmosphérique. Selon notre évaluation, cela ferait partie des conséquences les moins probables en raison de l'ampleur de l'appauvrissement en oxygène qui serait nécessaire pour augmenter considérablement la production de méthane.

- *Sulfure de diméthyle :* Le sulfure de diméthyle est un composé sulfuré volatil produit par les communautés microbiennes océaniques et il est la plus importante source d'aérosol sulfaté atmosphérique, lequel participe à la formation des nuages. La production accrue de sulfure de diméthyle due à la fertilisation des océans pourrait possiblement diminuer le réchauffement planétaire en augmentant l'albédo[2] de la Terre. On ne sait pas avec certitude si la fertilisation à grande échelle entraînerait une production accrue ou moindre de sulfure de diméthyle.

- *Halogénures de méthyle (halocarbures):* Les halogénures de méthyle sont aussi produits par le phytoplancton marin, bien qu'on ignore leur rôle biologique exact. Ce sont à la fois des gaz à effet de serre et des catalyseurs de l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique. Leur temps de séjour dans l'atmosphère est court (~ 1 an), mais leur potentiel de réchauffement planétaire est important. On a constaté une production accrue de bromométhane lors d'expériences de fertilisation en fer à moyenne échelle (< 1000 km^2).

- *Hexafluorure de soufre :* L'hexafluorure de soufre est un composé produit industriellement qui a été ajouté lors des expériences d'ajout de fer à moyenne échelle afin d'aider à suivre une zone d'eau fertilisée et de distinguer l'eau fertilisée de celle qui ne l'était pas et ainsi estimer le mélange des deux. L'hexafluorure de soufre est un gaz à effet de serre extrêmement puissant avec un très long temps de séjour dans l'atmosphère. Si on l'utilisait pour les expériences de fertilisation, il faudrait en inclure son apport en gaz à effet de serre dans l'évaluation de la réduction nette du potentiel de réchauffement planétaire.

[2] L'albédo d'un objet est une mesure de la force à laquelle il réfléchit la lumière.

Tableau 1. Conséquences négatives possibles de la fertilisation des océans. *L'émission accrue ou moindre de gaz ayant des effets sur le climat est considérée comme un impact important si l'effet du forçage radiatif atmosphérique excède de 5 % l'effet radiatif de la séquestration du carbone. Les expériences à moyenne échelle (p. ex., < 1000 km^2) sont identifiées comme étant utiles lorsqu'elles permettent de diminuer considérablement d'importantes incertitudes scientifiques en suspens. RCA = réchauffement climatique anthropique, AOS = appauvrissement de l'ozone stratosphérique..*

	Impact sur	Conséquence	Probabilité	Certitude	Expériences à moyenne échelle utiles?	Remarques
	Communauté phytoplanctonique	changements de communauté planctonique et de structure du réseau trophique	Élevée	Faible	Oui	changement quelconque pratiquement assuré; trajectoire non prévisible en détail; les expériences à moyenne échelle peuvent renseigner beaucoup sur la réponse de l'écosystème.
	Appauvrissement en oxygène	diminution locale de l'oxygène de subsurface	Élevée	Élevée	Oui	proportionnel à l'ampleur de la fertilisation.
		conditions hypoxiques/anoxiques en aval	Moyenne	Faible		selon l'endroit et l'échelle; effets cumulatifs au cours des décennies plus difficiles à évaluer.
	Acidification de l'océan	exacerbation de l'acidification des océans	Moyenne	Faible	Oui	à la fois possibilité d'exacerbation et d'atténuation.
Gaz ayant des effets sur le climat	Oxyde nitreux (N_2O)	augmentation locale du flux de N_2O sortant des océans	Élevée	Moyenne	Oui	proportionnel à l'ampleur de la fertilisation.
		augmentation en aval de l'écoulement de N_2O dans les océans	Moyenne	Faible		effets cumulatifs au cours des décennies difficiles à évaluer.
	Méthane (CH_4)	augmentation du flux de CH_4 sortant des océans	Faible	Moyenne à élevée		
	Sulfure de diméthyle (DMS)	augmentation du flux de DMS sortant des océans	Moyenne	Faible	Oui	à la fois possibilité d'exacerbation et d'atténuation du RCA; la compréhension scientifique des effets climatiques du flux accru de DMS est aussi faible.
	Halogénures de méthyle (halocarbures)	augmentation du flux d'halogénures sortant des océans	Moyenne	Faible	Oui	à la fois possibilité d'exacerbation et d'atténuation du RCA et de l'AOS.
	Hexafluorure de soufre (SF_6)	augmentation du flux de SF_6 sortant des océans	Élevée	Moyenne		utilisation continue nécessaire jusqu'à ce que des technologies de remplacement voient le jour.

2. **Dispose-t-on de suffisamment de connaissances pour déterminer l'échelle à laquelle un projet ne serait pas susceptible de causer des dommages irréversibles et inacceptables à l'écosystème? Le cas échéant, quels sont les critères qui pourraient nous permettre de définir les limites supérieures associées à un tel projet?**

Il n'y a pas suffisamment de connaissances pour établir une limite d'échelle supérieure pour les expériences de fertilisation des océans. Les résultats des expériences de fertilisation en fer des océans qui ont été effectuées jusqu'à maintenant n'ont pas permis de déterminer l'échelle à laquelle la fertilisation entraînera des modifications importantes de l'écosystème. Il y a toutefois une certaine confiance scientifique de pouvoir déterminer une « échelle seuil », de sorte que la fertilisation jusqu'à cette échelle ne provoquerait probablement pas de changements persistants pour un écosystème.

Les expériences de fertilisation effectuées jusqu'à maintenant l'ont été à une échelle très limitée et ont été en grande partie faites dans des régions en pleine mer qui sont riches en éléments nutritifs et pauvres en chlorophylle. Il est impossible d'affirmer avec certitude qu'il ne se produira pas d'impacts plus vastes pour l'écosystème et il y a eu des études théoriques qui indiquent que de petites perturbations peuvent avoir des répercussions à plus grande échelle par la dynamique intrinsèque de l'écosystème. Cependant, de tels scénarios sont hautement spéculatifs.

La fertilisation des océans se produit de façon naturelle, par exemple, près de certaines îles et par les tempêtes de poussière, et à des échelles spatiales beaucoup plus importantes que n'importe quel essai expérimental effectué jusqu'à maintenant. Cependant, il est peu probable qu'on puisse s'en servir comme seule méthode de substitution pour la compréhension de l'enrichissement intentionnel des océans à l'échelle de la géo-ingénierie; voilà pourquoi il a été proposé de faire plus d'expériences.

Le concept d'échelle est multidimensionnel. Les limitations spatiales ne peuvent être le seul critère en fonction duquel évaluer les expériences d'enrichissement intentionnel des océans. Il est nécessaire de prendre en considération la fréquence des événements de fertilisation, la variabilité saisonnière et interannuelle, la dispersion horizontale des matières particulaires et dissoutes, ainsi que l'emplacement (p. ex., composition de l'écosystème et proximité de zones sensibles) afin de générer un modèle écosystémique précis des effets.

Lorsque l'« échelle » d'une expérience augmente, la pertinence des résultats expérimentaux augmente aussi, tout comme le risque de changements pour l'écosystème. Pour l'instant, on ne peut déterminer la limite supérieure à laquelle la fertilisation des océans entraînera des modifications persistantes de l'écosystème que d'une seule façon : en la dépassant.

Dans le contexte de ce document, l'échelle seuil proposée est une limite supérieure de précaution. Il est irréaliste de s'attendre à pouvoir déterminer le point précis à partir duquel tout enrichissement supplémentaire entraînerait une modification persistante d'un écosystème. Il manque de connaissances à partir desquelles cela pourrait se faire. En tenant compte de l'incertitude, le seuil préventif proposé ci-dessous repose sur un niveau élevé de confiance qu'aucune modification persistante d'un écosystème ne se produirait.

Nous considérons peu probable qu'un projet de recherche ou pilote répondant aux critères suivants ait des effets négatifs persistants sur l'environnement :

- ne pas dépasser une superficie de 300 kilomètres carrés;

- quantité limitée de substances d'enrichissement (p. ex., pour le fer, ne pas dépasser seize tonnes);
- effets observables ne dépassant pas une période d'un an; et
- identification des zones sensibles côtières et marines adjacentes afin de connaître les possibles impacts lointains.

3. Est-ce que le cadre d'évaluation provisoire de la CL/PL convient pour évaluer les propositions de recherche scientifique mettant en cause la fertilisation des océans?

Le cadre d'évaluation provisoire de la Convention fournit un mécanisme d'évaluation, cas par cas, des propositions de fertilisation des océans afin de déterminer si elles représentent des recherches scientifiques justifiées. Il donne une liste complète d'impacts possibles et un cadre systématique pour leur évaluation.

En atteignant ses objectifs, le cadre tente d'assurer que la proposition de recherche est bien fondée et structurée (p. ex., être à une échelle qui n'excède pas ce qui est nécessaire afin de répondre à la question, que les mesures proposées permettront de répondre à la question posée et qu'un suivi et un examen des pairs appropriés soient prévus), que le travail de recherche n'entraînera pas des effets durables sur l'environnement marin et que les risques environnementaux soient minimisés tout en maximisant les avantages. Pour cet aspect, le cadre a établi les domaines clés à prendre en considération et, pour l'évaluation d'un projet important, ce cadre fournit une façon adéquate d'évaluer un projet.

D'un point de vue pratique, toutefois, la nature extensive du cadre selon son ébauche actuelle nécessitera une évaluation complète et la production de rapports, et l'information cherchée risque de ne pas être disponible sur-le-champ. Alors que ceci peut être justifié pour un projet à grande échelle, les risques et la capacité associés à des travaux à plus petite échelle seront aussi normalement moindres. Le risque de détourner vers l'évaluation la capacité et le financement de recherche limité, en particulier lorsqu'il n'y a pas de minimum de taille ou de facteur de risque associé au déclenchement du cadre, pourrait entraîner la conséquence imprévue qu'il devienne impossible de réaliser de la recherche fondamentale à petite échelle sur des aspects de la fertilisation des océans. L'on reconnaît que cela n'est probablement pas une conséquence prévue ou souhaitable de la réglementation de la recherche.

Lors de l'examen de recherches antérieures en lien avec la question 2, il a été noté qu'il pourrait être possible de mettre en place avec un certain niveau de confiance une échelle de projet de recherche à laquelle le risque pour l'environnement marin serait minime. La pertinence du cadre serait considérablement accrue par la mise en place d'une approche échelonnée reposant sur des critères définis, avec un niveau d'information requise correspondant plus étroitement au niveau probable de risque. Ceci a le potentiel de diminuer les impacts non intentionnels sur la recherche à petite échelle, sans nous éloigner des objectifs principaux du cadre. Il est recommandé de faire un examen de la base de connaissances en vue de l'élaboration et de la mise en application de critères pour effectuer l'évaluation environnementale des expériences de fertilisation, ainsi que pour établir une « échelle seuil » en deçà de laquelle les propositions pourraient être exemptées d'une évaluation complète.

On avance l'argument d'une approche à deux paliers pour les évaluations, car on a une certitude scientifique selon laquelle on peut établir une « échelle seuil » en deçà de laquelle une expérience n'entraînerait probablement pas de changements persistants pour un écosystème. Par conséquent, il peut être possible de mettre en place des critères qui pourraient permettre de faire une évaluation par la « voie rapide » qui serait davantage proportionnelle aux risques

possibles tout en satisfaisant à l'intention de prudence du cadre d'évaluation provisoire de la Convention et du Protocole. L'évaluation complète selon le cadre continuerait de s'appliquer pour les propositions qui dépassent l'échelle seuil.

Il peut aussi y avoir un deuxième enjeu pratique relativement aux spécialistes qui seraient en mesure d'effectuer les évaluations en vertu du cadre. La communauté scientifique qui participe à ce type de recherche est relativement restreinte. La préoccupation relativement à la capacité d'un seul pays à mettre en œuvre le cadre d'évaluation donne à penser que, si possible, il devrait y avoir un organisme international disponible pour aider à faire les évaluations. La nécessité d'avoir un tel organisme international est d'autant plus forte qu'il peut y avoir des cas où les scientifiques semblent en conflit d'intérêts en ce qui a trait à l'évaluation d'un projet donné. Pour que le processus demeure crédible, il doit s'acquitter du fardeau de la preuve acceptable selon lequel le processus est transparent et honnête.

4. Quels domaines de la recherche sur la fertilisation des océans affichent le caractère le plus urgent ou la plus grande importance?

L'apport d'éléments nutritifs clés — azote, phosphore, silicate, fer — au phytoplancton dans les eaux de surface varie considérablement par région, selon la saison et selon les dépôts atmosphériques et les écoulements d'eau douce près des côtes. L'ampleur et la proportion de ces ajouts changeront selon le climat et les activités humaines. L'impact de l'ajout d'éléments nutritifs sur la structure de la communauté phytoplanctonique, sur la sédimentation et sur les cycles biogéochimiques demeure donc un secteur actif de la recherche scientifique avec d'importantes répercussions pour l'humanité, peu importe si l'on va de l'avant avec la fertilisation des océans comme stratégie de géo-ingénierie. Notre faible capacité à surveiller et à prévoir la réponse de l'écosystème aux perturbations est combinée à l'incertitude scientifique relativement à ce qui constitue la situation de base d'un écosystème — c'est-à-dire comment la variabilité spatiale et temporelle de l'approvisionnement en éléments nutritifs donne forme aux écosystèmes. On ne manque pas de questions scientifiques importantes relativement à la fertilisation des océans.

Le but de cet exercice n'était pas de produire une liste complète. Il a principalement été question des points urgents pour lesquels il y a le plus d'incertitude. Ceux-ci comprennent l'influence générale des nutriments limitatifs sur les fonctions écologiques et biogéochimiques, les changements de la structure des communautés et ses impacts sur les transferts d'énergie et sur les communautés pélagiques, la reminéralisation et le transport des particules, la nitrification et la dénitrification, la compréhension de la variabilité naturelle de la situation de base et faire la distinction entre la variabilité naturelle et les effets de dilution d'une part et les conséquences directes de la fertilisation d'autre part.

Sources d'incertitude

L'efficacité de la fertilisation des océans comme stratégie de géo-ingénierie reste à prouver. Nous avons peu confiance en la fertilisation des océans pour améliorer l'absorption par les océans du dioxyde de carbone dans l'atmosphère à des échelles significatives pour lutter contre les changements climatiques, et nous avons encore moins confiance que les effets de la manipulation des océans à ces échelles peuvent être prévus et vérifiés pendant des décennies.

Il est difficile de prévoir jusqu'à quel point les conséquences intentionnelles de la fertilisation des océans auront des impacts sur la composition et les fonctions du réseau trophique. On en sait encore moins sur les conséquences non intentionnelles et les effets lointains. À l'heure

actuelle, il manque de connaissances scientifiques pour prévoir l'échelle à laquelle la fertilisation des océans entraînera des modifications persistantes de l'écosystème.

CONCLUSION

Les expériences de fertilisation ont été très précieuses pour l'étude de la dynamique et du fonctionnement des écosystèmes océaniques et des cycles biogéochimiques, mais il est peu probable que des expériences isolées puissent permettre de résoudre les questions critiques entourant les conséquences à long terme de la fertilisation des océans comme mesure d'atténuation contre les changements climatiques. Il faudrait favoriser la recherche scientifique future sur la fertilisation des océans afin d'améliorer notre compréhension de la réponse des océans à l'ajout d'éléments nutritifs. De l'expérimentation novatrice, encadrée par des critères rigoureux réglementés par une autorité compétente internationalement reconnue, pourrait contribuer à l'avancement des sciences de l'océanographie et de la biogéochimie, et ce, avec des impacts environnementaux négligeables.

SOURCES DE RENSEIGNEMENTS

de Baar, H. J. W., et coll., Synthesis of iron fertilization experiments: from the iron age in the age of enlightenment, J. Geophys. Res., 110, 10.1029/2004JC002601, 2005.

de Baar, H. J. W., L. J. A. Gerringa, P. Laan, et K. R. Timmermans, Efficiency of carbon removal per added iron in ocean iron fertilization, Mar. Ecol. Prog. Ser., 364, 269-282, 2008.

Boyd, P. W., et coll., Mesoscale iron enrichment experiments 1993-2005: Synthesis and future directions, Science 315, 612-617, 2007.

Glibert, P.M., et coll., Ocean urea fertilization for carbon credits poses high ecological risks. Mar. Poll. Bull., 56, 1049-1056, 2008.

Martin, J. H., et coll., Testing the iron hypothesis in ecosystems of the equatorial Pacific Ocean, Nature, 371, 123-129, 1994.

Matear, R. J., et B. Elliott, Enhancement of ocean uptake of anthropogenic CO_2 by macronutrient fertilization, J. Geophys. Res., 109, 10.1029/2000JC000321, 2004.

POUR DE PLUS AMPLES RENSEIGNEMENTS

Communiquer avec : Denis Gilbert
Pêches et Océans Canada
Institut Maurice-Lamontagne
850, route de la Mer
Mont-Joli (Québec) Canada G5H 3Z4
Téléphone : 418-775-0570
Télécopieur : 418-775-0546
Courriel : Denis.Gilbert@dfo-mpo.gc.ca

Ou

Jim Christian
Pêches et Océans Canada
Institut des sciences de la mer
9860, chemin West Saanich
Sidney (C.-B.) Canada V8L 4B2
Téléphone : 250-363-8319
Télécopieur : 250-363-8247
Courriel : James.Christian@dfo-mpo.gc.ca

Ce rapport est disponible auprès du :

Secrétariat canadien de consultation scientifique
Région de la capitale nationale
Pêches et Océans Canada
200, rue Kent
Ottawa (ON) K1A OE6

Téléphone : 613-990-0293
Télécopieur : 613-990-2471
Courriel : CSAS@dfo-mpo.gc.ca
Adresse Internet : www.dfo-mpo.gc.ca/csas

ISSN 1919-5109 (Imprimé)
ISSN 1919-5117 (En ligne)

© Sa Majesté la Reine du Chef du Canada, 2010

An English version is available upon request at the above address.

LA PRÉSENTE PUBLICATION DOIT ÊTRE CITÉE COMME SUIT

MPO. 2010. Fertilisation des océans : atténuation des impacts environnementaux de la recherche scientifique. Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2010/012.